

ГЕОИНДУЦИРОВАННЫЕ ТОКИ ВО ВРЕМЯ СУПЕРСУББУРЬ В СЕНТЯБРЕ 2017 Г.

П.В. Сецко¹, И.В. Дэспирак¹, Я.А. Сахаров¹, В.А. Билин¹, В.Н. Селиванов²

¹Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия
setsko@pgia.ru

²Центр физико-технических проблем энергетики Севера ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты, Россия

GEOINDUCED CURRENTS DURING SUPERSUBSTORMS IN SEPTEMBER 2017

P.V. Setsko¹, I.V. Despirak¹, Ya.A. Sakharov¹, V.A. Bilin¹, V.N. Selivanov²

¹Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia
setsko@pgia.ru

²Northern Energetics Research Centre, Apatity, Russia

Аннотация. Исследовано появление геомагнитных индуцированных токов (ГИТ) во время суперсуббурь, которые развивались на фоне магнитных бурь 7–8 сентября 2017 г. ГИТ анализировались на основе данных станций регистрации в Россия, Финляндии, Новой Зеландии и Шотландии. Показано, что динамика ГИТ подобна пространственно-временной динамике суббурь западного электроджета, при этом максимальные значения ГИТ наблюдались на станциях в полуденном секторе.

Ключевые слова: геомагнитные индуцированные токи, суперсуббури, магнитные бури, суббури

Abstract. We studied the appearance of geomagnetic induced currents (GIC) during supersubstorms that developed during magnetic storms on 7–8 September 2017. GIC were analyzed using data from stations in Russia, Finland, New Zealand and Scotland. It is shown that GIC developed similarly to the spatiotemporal dynamics of the substorm western electrojet, with maximum GIC values observed when stations were in the midnight sector.

Keywords: geomagnetic induced currents, supersubstorms, magnetic storms, substorms

ВВЕДЕНИЕ

Геоиндуцированные токи (ГИТ), возникающие в электрических сетях, в газо- и нефтепроводах, могут оказывать негативное влияние на работу технических систем и сетей и даже вызывать аварии. Одним из важных источников ГИТ в авроральной зоне является усиление и движение электроджетов во время суббурь [Tsurutani, Hajra, 2021]. Суббури с очень высокими значениями *SML*- и *AL*-индексов (< –2500 нТл) были названы суперсуббурями (SSS) [Tsurutani et al., 2015]. Целью работы является проверка предположения, что ГИТ могут быть связаны с развитием SSS во время магнитных бурь [Hajra et al., 2016], для этого рассмотрено появление ГИТ во время двух SSS 7–8 сентября 2017 г., когда произошли две последовательные магнитные бури (*Dst* ~ –150 и –115 нТл).

ДАННЫЕ

ГИТ анализировались с помощью минутных данных системы регистрации на Карело-Кольской ЛЭП на Северо-Западе России, в авроральной зоне (от ~62° до ~69° N), где для измерений используется метод регистрации тока в нейтрали силового трансформатора [eurisgic.ru] [Сахаров и др., 2007, 2019], а также данных Финского метеорологического института, которые получены с газопровода вблизи г. Мантсала, находящегося в субавроральной зоне (~60° N) [space.fmi.fi/gic/index.php]. Эти наблюдения сравнивались с результатами регистрации ГИТ в Новой Зеландии (~45° N) и в Шотландии (~56° N), которые были взяты из статьи [Clilverd et al., 2021]. Появление и развитие суббури определялось по данным магнитометров сетей IMAGE [space.fmi.fi/image] и SuperMAG [supermag.jhuapl.edu].

Для исследования пространственного распределения магнитных возмущений использовались карты распределения ионосферных эквивалентных электрических токов над Скандинавией [space.fmi.fi/MIRACLE; Viljanen, Hakkinen, 1997] и карты векторов магнитного поля [Gjerloev, 2009; Newell, Gjerloev, 2011]. Локальная геомагнитная активность на скандинавском меридиане IMAGE определялась по *IL*-индексу [space.fmi.fi/image/www/il_index_panel.php]. Начало суббури контролировалось с помощью *W_p*-индекса [Nose et al., 2012; www.isee.nagoya-u.ac.jp/~nose.masahito/s-cubed/data/index.html].

РЕЗУЛЬТАТЫ

По вариациям *SML*-индекса 7–8 сентября 2017 г. наблюдались две суперсуббури [Дэспирак и др., 2021]. На рис. 1 приведены вариации *SML*-индекса с 15 UT 7 сентября по 21 UT 8 сентября, суперсуббури отмечены как SSS-1 и SSS-2.

Рассмотрим отдельно первый период с 21 UT 7 сентября до 04 UT 8 сентября. SSS-1 началась 7 сентября в ~22:20 UT и достигла максимума (*SML* ~ –3600 нТл) в ~00:25 UT 8 сентября. Как следует из вариации магнитного поля на станциях сети IMAGE



Рис. 1. Вариации *SML*-индекса во время двух суперсуббурь 7–8 сентября 2017 г.

(в статье не приводится), SSS-1 состояла из трех активизаций: в ~23:00, ~23:55 и ~00:30 UT, и во время всех трех активизаций появлялись интенсивные ГИТ на широтном профиле электроджетов от ст. Мантсала (MAN) до ст. Выходной (VKH) (рис. 2, в), а также с некоторой задержкой — на ст. Torness (TOR, рис. 2, з). На рис. 2, в показаны значения ГИТ на ст. VKH, KND (Кондопога) и MAN, а также значения IL - и W_p -индексов. На рис. 2, з значения ГИТ на ст. TOR (Шотландия) и Halfway Bush (HWB, Новая Зеландия).

Из карты векторов магнитного поля сети SuperMAG (рис. 2, б) видно, ст. MAN–VKH в указанное время находились в послеполуночном секторе (~2 MLT), ст. TOR находилась в полуночном секторе (~24 MLT). Как следует из широтного профиля распределения ионосферных эквивалентных электрических токов на рис. 2, а, развитие западного электроджета происходило на ~61–75° N. Видно, что в ~23:00 UT западный электроджет усилился и наблюдался его бросок к полюсу от ~61° до ~71° N. Это находит отражение в профилях ГИТ (MAN ~13.5 A, KND ~11 A, VKH ~68 A) и IL - и W_p -

индексов. Вторая интенсификация была в ~23:55 UT от ~63° до ~72° N, что также находит отражение в профилях ГИТ (MAN ~10 A, KND ~6 A, VKH ~65 A). Третья наблюдалась в ~00:30 UT, когда произошел бросок электроджета к полюсу до ~75° N, что вновь сопоставимо с профилями ГИТ (MAN ~21 A, KND ~9 A, VKH ~53 A) и геомагнитных индексов. На ст. TOR также видны все три активизации, но с некоторой временной задержкой — в 23:15, 00:30 и 01:25 UT. На ст. HWB сильный ГИТ был около 01:30, когда HWB двигалась от полуденного в вечерний сектор. На всех станциях, вне зависимости от их положения, замечен пик ГИТ в ~23 UT, соответствующий внезапному началу суббури (SSC).

Рассмотрим второй период с 10 до 22 UT 8 сентября (рис. 3), который включает в себя начавшуюся после прихода ударной волны SSS-2 и две интенсивные суббури (< -1000 нТл) в ~16 и ~18 UT, которые определены по данным станций IMAGE (в статье не приводятся). На рис. 3, б представлены карты векторов магнитного поля системы SuperMAG для моментов максимального развития SSS-2 и двух суббурь (в 13, 16:10 и 18:10 UT). На первой карте видны сильные возмущения в полуночном секторе

7-8 сентября 2017 года

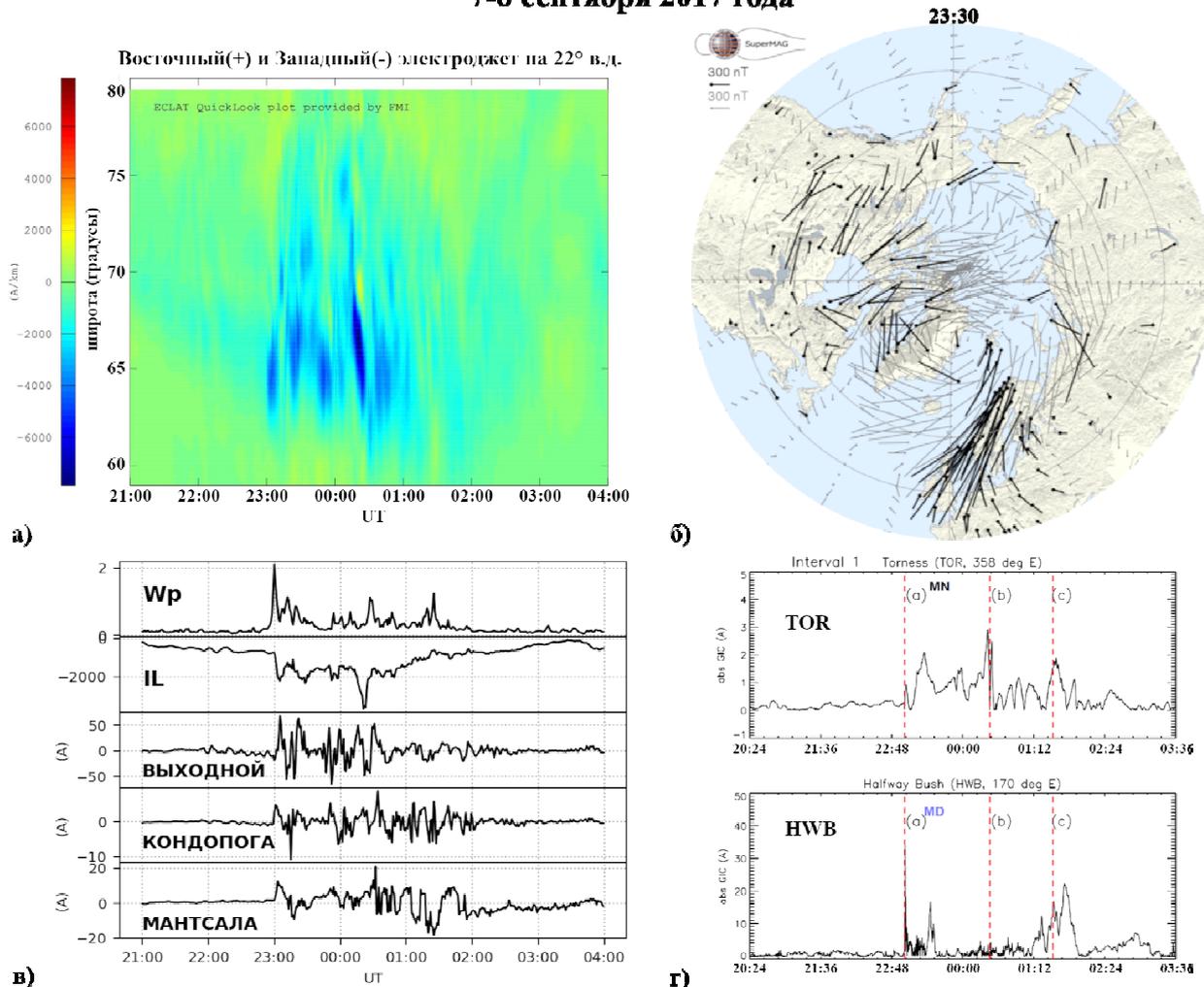


Рис. 2. Наблюдения магнитных вариаций и ГИТ с 21 UT 7 сентября до 04 UT 8 сентября 2017 г.: а — широтный профиль электроджетов (MIRACLE); б — карта пространственного распределения векторов магнитного поля (SuperMAG); в — IL - и W_p -индексы и ГИТ на ст. VKH, KND, MAN; г — ГИТ на ст. TOR и HWB (из работы [Ciliverd et al., 2021])

8 сентября 2017 года

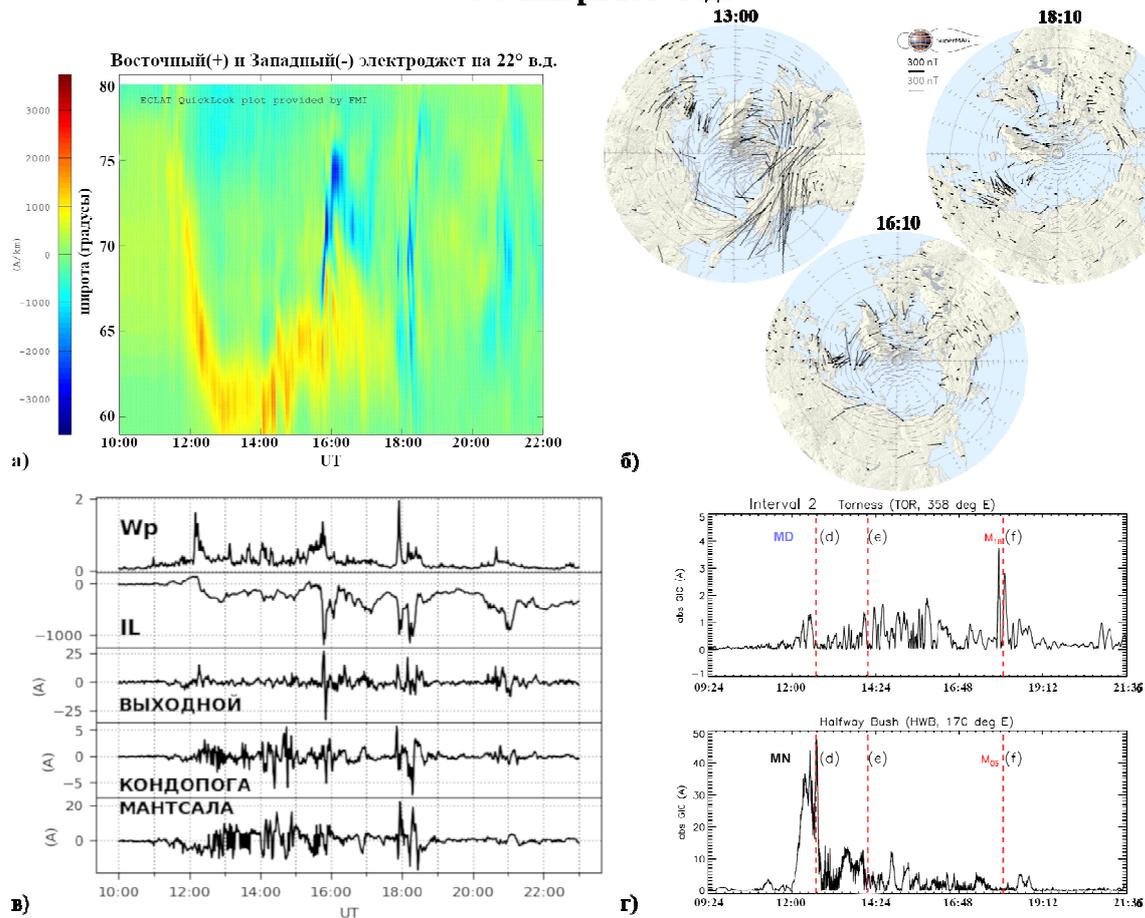


Рис. 3. Наблюдения магнитных вариаций и ГИТ с 10 до 22 UT 8 сентября 2017 г.: *а* — широтный профиль электроджетов (MIRACLE); *б* — карта пространственного распределения векторов магнитного поля (SuperMAG); *в* — IL - и W_p -индексы и ГИТ на ст. VKH, KND, MAN; *г* — ГИТ на ст. TOR и HWB (из работы [Clilverd et al., 2021])

на станциях Аляски и Канады. В это время очень интенсивные ГИТ наблюдались на находящейся в вечернем секторе ст. HWB (~50 A, рис. 3, *г*). Усиления восточного электроджета в секторе MLT=15–16 ч видны с ~12 до 14 UT на рис. 3, *а* на широтах ~67°–60° N, что соответствует развитию SSS-2 в ночном секторе и появлению ГИТ с 13 до 15 UT на ст. MAN (до ~16 A), KND (до ~6 A) и TOR в дневном секторе. На ст. VKH ГИТ (~15 A) появился лишь с приходом ударной волны в ~12:15 UT (рис. 3, *в*). На второй карте на рис. 3, *б* в MLT=18–19 ч и на рис. 3, *а* в ~16 UT видно усиление западного электроджета на авроральных и высоких широтах 66° до 75° N. В ~15:50 UT сильный ГИТ наблюдался на ст. VKH (~33 A) и небольшие ГИТ на ст. MAN и KND (~9 и ~5 A), что соответствует широтному профилю распространения западного электроджета во время второй суббури. На третьей карте в секторе MLT=21–22 ч видно усиление западного электроджета по всему широтному профилю наблюдения цепочки IMAGE, что подтверждается рис. 3, *а*, где ~18 UT западный электроджет перемещался от 62° до 75° N. В это время ГИТ наблюдались на всех станциях от MAN до VKH (рис. 3, *в*) и ст. TOR (рис. 3, *г*). Стоит отметить, что все три суббури были отмечены пиками W_p -индекса, а вторая и третья суббури — также пиками IL -индекса (~–1000 нТл)

ВЫВОДЫ

В работе проанализирована тонкая пространственно-временная структура электроджетов во время SSS на основе широтных профилей эквивалентных токов системы MIRACLE и проведено сравнение с данными ГИТ на Северо-Западе России, в Финляндии, Шотландии и Новой Зеландии. Подтверждено, что появление ГИТ на разных широтах связано с движением к полюсу западного электроджета [Воробьев и др., 2018]. Интересной особенностью рассматриваемого события является то, что SSS произошли с разницей в 12 ч, что дает возможность проследить появление ГИТ на одной системе регистрации как в ночном, так и в дневном секторе. Показанная связь между увеличением геомагнитных индексов IL и W_p и появлением ГИТ также указывает на зависимость появления ГИТ от суббуриной активности, как и в ранее рассмотренных нами случаях [Дэспирак и др., 2022].

Авторы выражают благодарность создателям баз данных OMNI [<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>], SuperMAG [<http://supermag.jhuapl.edu/>], IMAGE [<http://space.fmi.fi/image/>] за возможность их использования в работе. Работа Сецко П.В., Дэспирак И.В., Билина В.А. выполнена в рамках гранта РФФИ № 20-55-18003. Работа Сахарова Я.А. и Селиванова В.Н. по регистрации ГИТ выполнена при поддержке проекта РНФ №22-29-00413.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Воробьев В.Г., Сахаров Я.А., Ягодкина О.И., Петрукович А.А., Селиванов В.Н. *Труды Кольского научного центра РАН*. 2018. Т. 4. С. 16–28. DOI: [10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.5.16-28](https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.5.16-28)

Дэспирак И.В., Клейменова Н.Г., Громова Л.И., Громов С.В., Малышева Л.М. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2020. Т. 60, № 3. С. 308–317.

Дэспирак И.В., Сецко П.В., Сахаров Я.А., Любич А.А., Селиванов В.Н., Валев Д. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2022. Т. 62, № 6.

Сахаров Я.А., Данилин А.Н., Остафийчук Р.М. *7-й Международ. симп. по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии: Труды*. Санкт-Петербург, 26–29 июня 2007 г. СПб., 2007. С. 291–293.

Сахаров Я.А., Катькалов Ю.В., Селиванов В.Н., Вильянен А. Практические аспекты гелиогеофизики. *XI ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе»: Труды*. 2016. Москва, ИКИ, 17 февраля 2016 г., С. 134–145.

Clilverd M.A., Rodger C.J., Freeman M.P., Brundell J.B., et al. *J. Space Weather and Space Climate*. 2021. DOI: [10.1051/swsc/2021014](https://doi.org/10.1051/swsc/2021014).

Gjerloev J.W. *EOS Trans. AGU*. 2009. Vol. 90, no. 27. P. 230–231. DOI: [10.1029/2009EO270002](https://doi.org/10.1029/2009EO270002).

Hajra R., Tsurutani B.T., Echer E., Gonzalez W.D., Gjerloev J.W. *J. Geophys. Res.* 2016. Vol. 121, no. 8. P. 7805–7816. DOI: [10.1002/2015JA021835](https://doi.org/10.1002/2015JA021835).

Newell P.T., Gjerloev J.W. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2011. Vol. 116, no. A12, A12211. DOI: [10.1029/2011JA016779](https://doi.org/10.1029/2011JA016779).

Nosé M., Iyemori T., Wang L. et al. *Space Weather*. 2012. Vol. 10, no. 8, S08002. DOI: [10.1029/2012SW000785](https://doi.org/10.1029/2012SW000785).

Tsurutani B.T., Hajra R. *J. Space Weather and Space Climate*. 2021. Vol. 11, 23. DOI: [10.1051/swsc/2021001](https://doi.org/10.1051/swsc/2021001).

Tsurutani B.T., Hajra R., Echer E., Gjerloev J.W. *Ann. Geophys.* 2015. Vol. 33, no. 5. P. 519–524. DOI: [10.5194/angeo-33-519-2015](https://doi.org/10.5194/angeo-33-519-2015).

Viljanen A., Häkkinen L. / ed. Lockwood M., Wild M.N., Opgenoorth H.J. *ESA Publications SP-1198*. 1997. P. 111–117.

URL: eurisgic.ru (дата обращения 23.06.2022).

URL: space.fmi.fi/gic/index.php (дата обращения 23.06.2022).

URL: supermag.jhuapl.edu (дата обращения 23.06.2022).

URL: space.fmi.fi/image (дата обращения 23.06.2022).

URL: space.fmi.fi/MIRACLE (дата обращения 23.06.2022).

URL: space.fmi.fi/image/www/il_index_panel.php (дата обращения 23.06.2022).

URL: www.isee.nagoya-u.ac.jp/~nose.masahito/s-cubed/data/index.html (дата обращения 23.06.2022).